

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

**Modelování vícepásmových
planárních antén**

Simulation of multi-band planar antennas

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Modelování vícepásmových planárních antén jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Ostravě dne 20. července 2009

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marku Dvorskému, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Ostravě dne 20. července 2009

.....

podpis autora

Abstrakt

Tato práce se zabývá technikami umožňující návrh více pásmových planárních antén kompaktních rozměrů. Dále se zaměřuje na optimalizaci těchto antén. Pomocí simulátoru elektromagnetického pole CST Microwave Studio byla navržena obdélníková mikropásková anténa s křížovou šterbinou pracující v půlvlnné rezonanci. Tato anténa byla vyrobena a změřena. Výsledky simulace a měření byly porovnány a vyhodnoceny.

Klíčová slova

Více pásmová anténa, planární anténa, CST Microwave Studio, obdélníková mikropásková anténa s křížovou šterbinou, poměr stojatých vln, cuprextit, SMA 500Ω.

Abstract

The project deals with techniques used for a design of multi-band planar antennas with compact proportions. It aims on multi-objective optimalization. The Rectangular Microstrip Antenna with the cross aperture working in half wave resonance has been designed in CST Microwave Studio - the simulator of the electromagnetic field.

Keywords

Multi-band antenna, planar antenna, CST Microwave Studio, rectangular microstrip antenna with a cross slot, voltage standing wave ratio, cuprextit, SMA 500Ω.

Bibliografická citace dle ČSN ISO 690

ŠKAŘUPA, V. *Modelování vícepásmových planárních antén*. Ostrava, 2009. 25s.
Bakalářská práce na Fakultě elektrotechniky a informatiky VŠB – TU Ostrava na katedře telekomunikační techniky. Vedoucí bakalářské práce Ing. Marek Dvorský, Ph.D.

Seznam použitých symbolů a značek

A	[m]	-	délka flíčku mikropáskové antény
B	[m]	-	šířka flíčku mikropáskové antény
L	[m]	-	délka flíčku mikropáskové antény
h	[m]	-	tloušťka dielektrického substrátu
H_y		-	složka magnetického pole
J_z		-	hustota proudu
l	[m]	-	délka křížové štěrby
m	[m]	-	šířka křížové štěrby
TE		-	transverzálně elektrická vlna
W	[m]	-	šířka flíčku mikropáskové antény
λ_0	[m]	-	délka vlny ve volném prostoru
λ_l	[m]	-	vlnová délka v substrátu
ϵ_r	[-]	-	relativní permitivita
ρ	[dB]	-	činitel odrazu
σ	[-]	-	poměr stojatých vln
PSV	[-]	-	poměr stojatých vln
S_{11}	[dB]	-	činitel odrazu
$\text{tg}\delta$	[-]	-	ztrátový činitel
VSWR	[-]	-	poměr stojatých vln
Z_A	[Ω]	-	vstupní impedance antény
Z_0	[Ω]	-	charakteristická impedance napáječe

Obsah

Úvod.....	1
1 Planární antény	2
1.1 Základní provedení planárních antén	2
1.1.1 Mikropáskové dipóly	4
1.1.2 Mikropáskové flíčkové antény.....	4
1.1.3 Tištěné štěrbinové antény	5
1.1.4 Mikropáskové antény s postupnou vlnou	6
1.2 Napájení planárních antén.....	6
1.2.1 Koaxiální napájení	7
1.2.2 Mikropáskové napájení.....	7
1.3 Význam štěrbin	8
2 Návrh a simulace obdélníkové mikropáskové antény s křížovou štěrbinou.....	9
2.1 Rozbor požadavků.....	9
2.2 Návrh Antény	10
2.3 Práce v CST Microwave Studiu.....	13
2.4 Výsledky simulace v CST Microwave Studio	13
3 Výroba a měření.....	17
4 Závěr	21
Literatura	22
Přílohy.....	23
Příloha 1 – výsledky měření	23

Úvod

Vyzařování a šíření elektromagnetických vln je oblastí, se kterou se denně setkáváme, aniž bychom si to uvědomovali.

V roce 1865 James Maxwell matematicky odvodil existenci elektromagnetické vlny šířící se rychlostí světla. Tím byl položen základ bezdrátové komunikace. Vytvořil rovnice, které vysvětlují všechny známé zákonitosti elektrických a magnetických polí. V roce 1888 experimenty Henricha Rudolfa Hertze, prokázaly existenci elektromagnetických vln. Prvním kdo poslal radiový signál přes Atlantský oceán, byl Marconi Guglielmo často označovaný otcem bezdrátové komunikace. V roce 1909 obdržel Nobelovu cenu za své výzkumy [1].

V dnešní době, po více než století vývoje a nových objevů, zažíváme drtivý nástup mobilní komunikace. Klíčovým prvkem se stala miniaturizace rozměrů antén. Proto se začalo používat planárních antén. První zmínky se objevily počátkem 50. let minulého století. Tehdy začala vznikat potřeba vyrobit plošné antény, které by dobře kopírovaly povrch letadel a další vojenské techniky. Až později došlo k aplikaci do ostatních sfér lidské činnosti.

Cílem bakalářské práce je navrhnout planární vícepásmovou anténu. Jako prostředek pro návrh této antény bude použit simulátor elektromagnetického pole CST Microwave Studio. Modelovaná anténa bude optimalizována v programu CST Microwave Studio. Optimalizovanou anténu budeme realizovat a proměříme. Výsledky měření srovnáme s výsledky simulace.

1 Planární antény

Díky svým rozměrům jsou planární (nebo také mikropáskové) antény jedním z nejrozšířenějších druhů antén. Jejich výroba je levná tím, že jsou vyráběny stejnou technologií jako tištěné spoje. S tím je spojena nevýhoda možnosti výroby antén pro velké výkony. Vysokým činitelem jakosti mikropáskové struktury je dána jejich další nevýhoda, úzkopásmovost. Problém může představovat nežádoucí vyzařování napájecího mikropáskového vedení, které deformuje vyzařovací diagram a snižuje účinnost antény. Tento problém částečně odstraňuje možnost napájení koaxiálním kabelem.

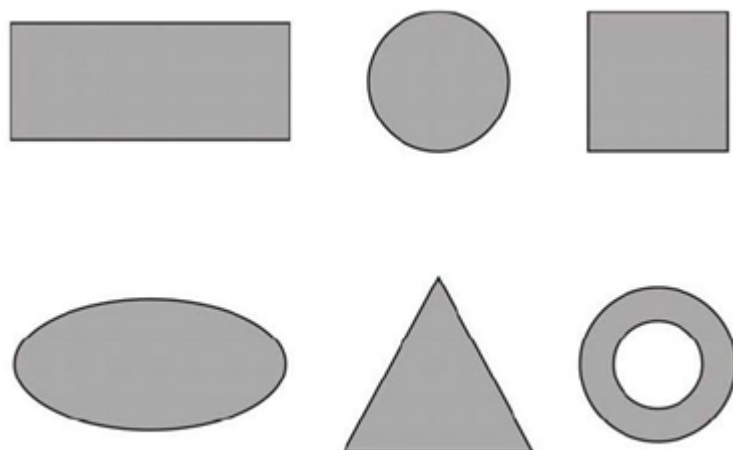
Termínem "vícepásmové planární antény" rozumíme takové antény, které pracují (rezonují) na dvou a více kmitočtech. V následujících kapitolách budou uvedeny nejznámější konstrukce těchto antén.

1.1 Základní provedení planárních antén

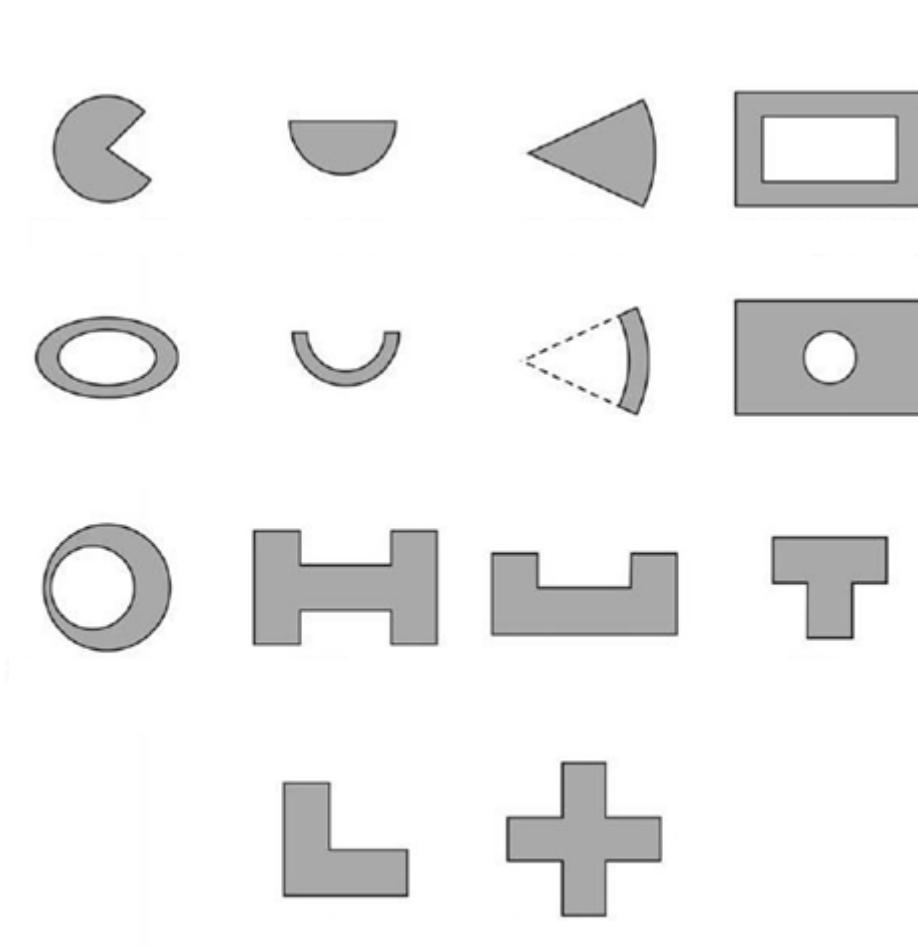
V praxi je používáno několik základních tvarů anténních prvků (obr. 1.1), nicméně použitelné jsou i další méně obvyklé tvary (obr. 1.2).

Mikropáskové antény lze rozdělit do čtyř základních skupin[3]:

- mikropáskové flíčkové antény,
- mikropáskové dipóly,
- tištěné šterbinové antény,
- mikropáskové antény s přechodovou vlnou [3].



Obr. 1.1 - Základní tvary fličkových antén často používaných v praxi



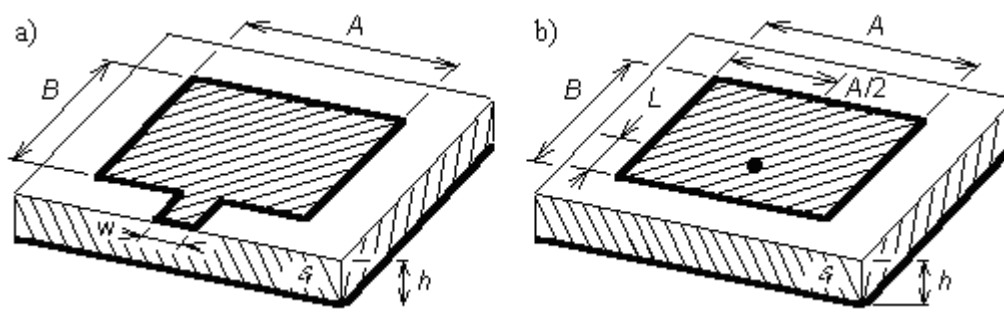
Obr. 1.2 - Méně obvyklé tvary fličkových antén

1.1.1 Mikropáskové dipóly

Planární dipóly odlišuje od pravoúhlých flíčkových antén jejich poměr délky k šířce, která je obvykle menší než $0,05 \lambda_0$ (délka vlny ve volném prostoru). Vyzařovací charakteristiky dipólu a flíčku jsou shodné při shodném podélném rozložení proudu. Ovšem vyzařovací odpor, šířka pásma a úroveň křížové polarizace se liší. Jsou to zajímavé antény díky malé velikosti a lineární polarizaci. Jsou vhodné pro vyšší frekvence a dosahují výrazných šířek pásma [3].

1.1.2 Mikropáskové flíčkové antény

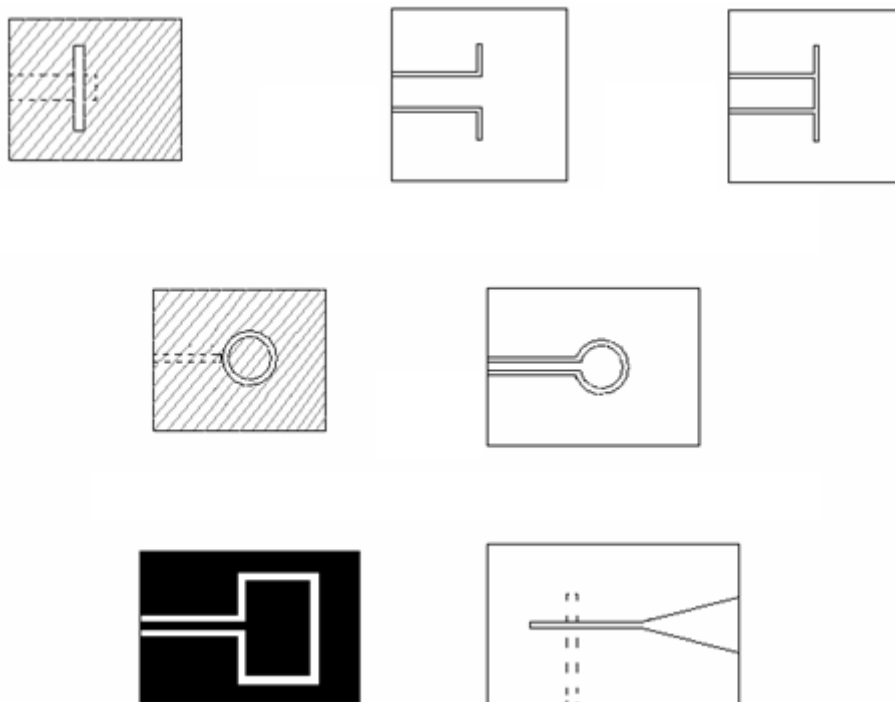
Mikropásková flíčková anténa je tvořena vodivým flíčkem, o stranách A a B s přibližnými rozměry $\lambda/2$, na jedné straně dielektrického substrátu, o tloušťce h a relativní permitivitě ϵ_r s co nejmenšími ztrátami, a zemnicí deskou na straně druhé (obr. 1.3). Základní tvary často používané v praxi jsou na obr. 1.1. Mají souměrné vyzařovací charakteristiky a obvykle zisk mezi 5 až 6 dB. Méně obvyklé tvary flíčků (obr. 1.2) se používají pro speciální aplikace [3].



Obr. 1.3 - Planární flíčková anténa napájena: mikropáskovým vedením (vlevo), koaxiální sondou (vpravo)

1.1.3 Tištěné štěrbinové antény

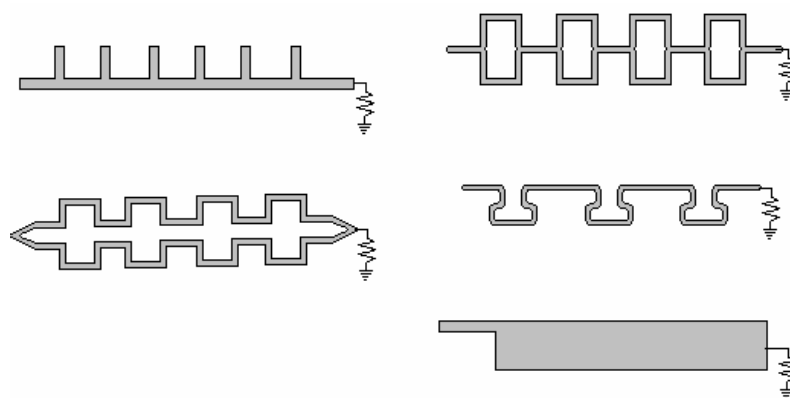
Štěrbínové antény se skládají ze štěrbin v zemnicí desce a může mít v podstatě jakýkoli průřez. Běžně se používá jen několik základních tvarů štěrbin: obdélníková štěrbina, kruhová štěrbina, obdélníkový prstenec a zužující se (kuželová) štěrbina (obr. 1.4). Štěrbínové antény vyzařují po obou stranách štěrbiny [3].



Obr. 1.4 - Tvary tištěných štěrbinových antén

1.1.4 Mikropáskové antény s postupnou vlnou

Mikropáskové antény s postupnou vlnou se mohou skládat ze zřetěžených pravidelných úseků vedení nebo dlouhých mikropáskových úseků s dostatečnou šířkou pásku pro podporu šíření příčně elektrických (TE) vln. Konec antény s postupnou vlnou je zakončen přizpůsobenou odporovou zátěží zabraňující vzniku stojatých vln na anténě. Různé konfigurace antén s postupnou vlnou jsou nakresleny na obr. 1.5 [3].



Obr. 1.5 - Některé typy tištěných mikropáskových antén s postupnou vlnou

1.2 Napájení planárních antén

Mikropáskové antény mají vyzařovací prvky na jedné straně dielektrického substrátu. K jejich napájení lze tedy s výhodou použít mikropáskové vedení nebo koaxiální sondu. Kromě těchto klasických způsobů napájení bylo vyvinuto mnoho jiných způsobů. Nejdůležitější z nich jsou [3]:

- koplanární napájení;
- napájení blízkým vedením;
- napájení přes štěrbinu;
- napájení koplanárním vedením.

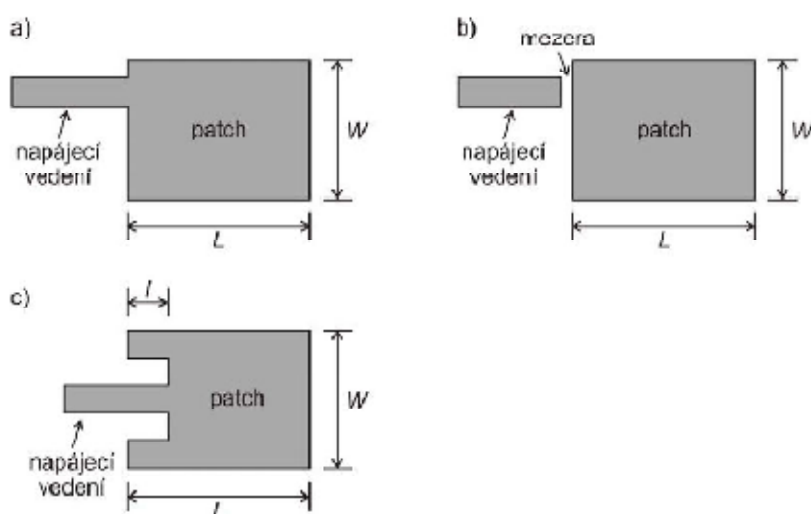
Výběr typu napájení je ovlivněn množstvím faktorů. Nejdůležitější je efektivní přenos energie mezi vyzařující strukturou a zářičem, tzn. zdroj a zářič musí být impedančně přizpůsobeny. Dalším podstatným faktorem je parazitní vyzařování napájecího vedení, které může zvýšit úroveň bočních laloků [3].

1.2.1 Koaxiální napájení

Napájení koaxiální sondou je jedním ze základních způsobů napájení mikropáskových antén. Vnější vodič koaxiálního konektoru je připojen k zemní desce substrátu a středový koaxiální vodič je po průchodu substrátem připájený ke kovovému anténnímu prvku v takovém místě, v němž je dosaženo impedančního přizpůsobení. Na druhou stranu však při koaxiálním napájení ztrácíme jednu významnou přednost mikropáskových antén, a to snadnou realizaci napájecího systému při sdružování mikropáskových anténních prvků do anténních soustav.

1.2.2 Mikropáskové napájení

Buzení mikropáskové antény mikropáskovým vedením na jednom substrátu představuje přirozenou volbu, protože flíček může být uvažován jako pokračování mikropáskového vedení, takže obě struktury jsou vyráběny najednou (obr. 1.6).

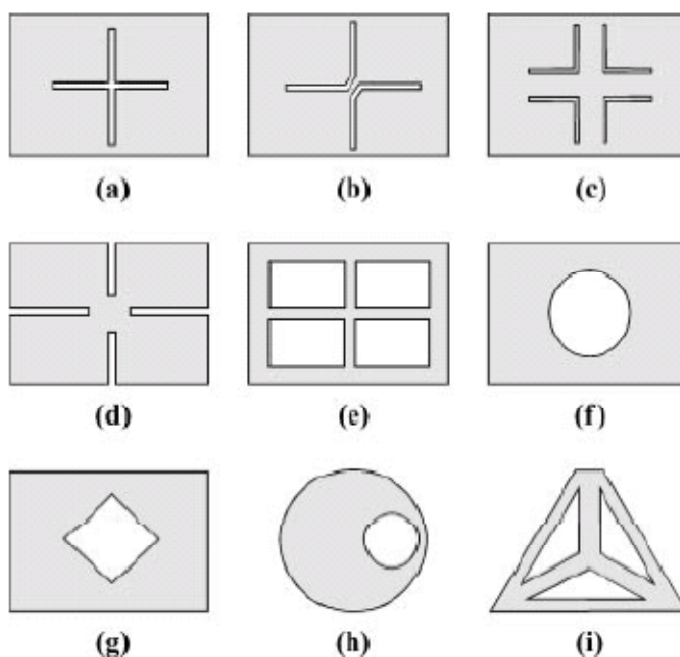


Obr. 1.6 - Způsoby koplanárního napájení

Impedančního přizpůsobení anténního flíčku k mikropáskovému napáječi může být dosaženo několika způsoby - mikropásek lze připojit k flíčku mimo střed vstupní hrany nebo pomocí oddělující šterbiny lze napájecí mikropásek vnořit hlouběji do flíčku. Buzení flíčku mikropáskovým vedením připojeným ke vstupní hraně flíčku je možno popsat pomocí ekvivalentní hustoty proudu J_z tekoucího mikropáskem a složky magnetického pole H_y mikropáskového vedení v rovině spojení s anténou [3].

1.3 Význam šterbin

Význam šterbin je v možnosti vytvoření druhé pracovní frekvence a v její optimalizaci na požadovanou velikost. Šterbiny mohou být různých tvarů:



Obr. 1.7 - Různé tvary šterbin pro vícepásmové planární antény

2 Návrh a simulace obdélníkové mikropáskové antény s křížovou štěrbínou

Cílem této práce je navrhnout planární vícepásmovou anténu. Vybrána byla obdélníková mikropásková anténa s křížovou štěrbínou.

Nejprve si zvolíme 2 kmitočty na kterých bude anténa rezonovat. První frekvenci volíme 1,8 GHz pro práci v GSM. Druhou frekvenci volíme 2,4 GHz pro práci na WiFi.

Požadované parametry mikropáskové antény:

- $f_1=1,8$ GHz
- $f_2=2,4$ GHz
- $Z=50\Omega$
- $PSV < 1,5$
- konektor SMA

2.1 Rozbor požadavků

Abychom zajistili správný pracovní režim antény, musí být vstupní impedance antény Z_A v uvedených kmitočtových pásmech blízká (ideálně stejná) k charakteristické impedanci napáječe Z_0 . V našem případě se jedná o koaxiální kabel, resp. konektor pro jeho připojení, s $Z_0 = 50 \Omega$. Pokud anténa tento požadavek nesplní, vznikají na napáječi vlny odražené, a tím dochází k poklesu účinnosti přenosu výkonu. Podmínku $Z_A = Z_0$ nelze vždy splnit úplně přesně. Pak se snažíme stavu přizpůsobení alespoň přiblížit [4]. Kvalita přizpůsobení se většinou hodnotí podle absolutní hodnoty činitele odrazu ($|S_{11}|, |\rho|$)

$$|\rho| = \left| \frac{Z_A - Z_0}{Z_A + Z_0} \right| \quad (1)$$

a nebo podle velikosti poměru stojatých vln (PSV, σ , VSWR),

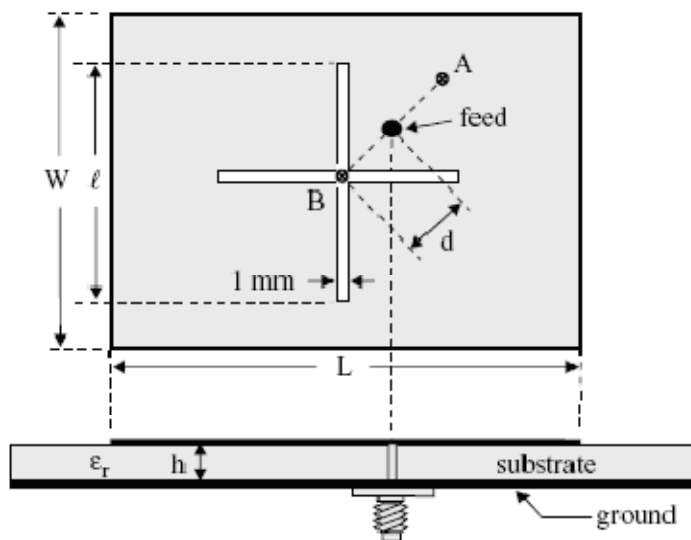
$$PSV = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}. \quad (2)$$

Dokonalé impedanční přizpůsobení odpovídá hodnotám $PSV = 1$ a $|\rho| = 0$. Pro hodnocení kvality přizpůsobení lze orientačně použít následující hodnoty [4]:

- velmi dobré přizpůsobení $PSV < 1,1$ (např. televizní vysílače),
- dobré přizpůsobení $PSV < 1,5$ až 2 (běžná zařízení),
- vyhovující přizpůsobení $PSV < 3$ až 5 (nenáročná zařízení).

2.2 Návrh Antény

Jako substrát zvolím nejdostupnější materiál Cuprexit ($\epsilon_r=4,2$, $\text{tg}\delta=0,005$, $h=1,22$ mm), vodivý materiál PEC (tloušťka materiálu $150\mu\text{m}$). Anténa bude napájena koaxiálním kabelem.



Obr. 2.1 - Obdélníková mikropásková anténa s křížovou štěrbínou [6]

Nejprve zvolím dva kmitočty, na který bude tato anténa rezonovat a to $f_1=1800\text{MHz}$ a $f_2=2400\text{MHz}$. Z těchto frekvencí použiji menší a to $f_1=1800\text{MHz}$ (protože vlnová délka v substrátu pro tuto frekvenci je delší než pro frekvenci 2400MHz) pro výpočet vlnové délky ve vzduchu podle:

$$\lambda_0 = \frac{c}{f_1} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,8 \cdot 10^9} = 167,1309\text{mm} \quad (3)$$

Vlnovou délku ve vzduchu je potřeba zpoměřovat odmocninou z relativní permitivity substrátu a tím dostaneme vlnovou délku v substrátu podle vztahu:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_{01}}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{167,1309}{\sqrt{4,2}} = 81,552\text{mm} \quad (4)$$

Pro vzdálenost L jsem využil vztahu pro půlvlnou rezonanci:

$$L = \frac{\lambda_1}{2} = \frac{81,552}{2} = 40,776\text{mm} \quad (5)$$

Rozměr W určíme zpoměřováním rozměru L v poměru 1,4, jenž je o něco větší než poměr frekvencí 1,333:

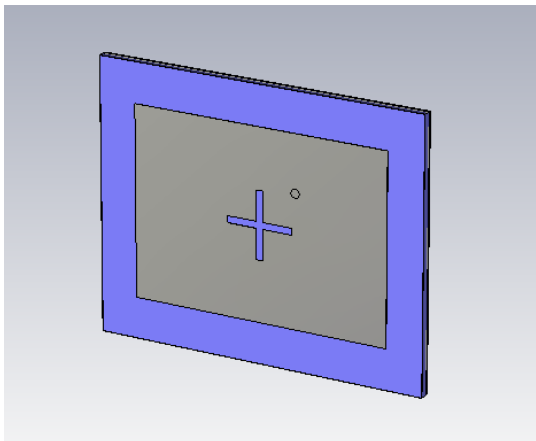
$$W = \frac{L}{1,4} = \frac{40,776}{1,4} = 29,126\text{mm} \quad (6)$$

Z vybraných frekvencí volíme l mezi 8 a 12 mm a to $l=10\text{mm}$ podle tabulka 1.

Tabulka 1 – Frekvence a rozměry k obrázku 2.1 [6]

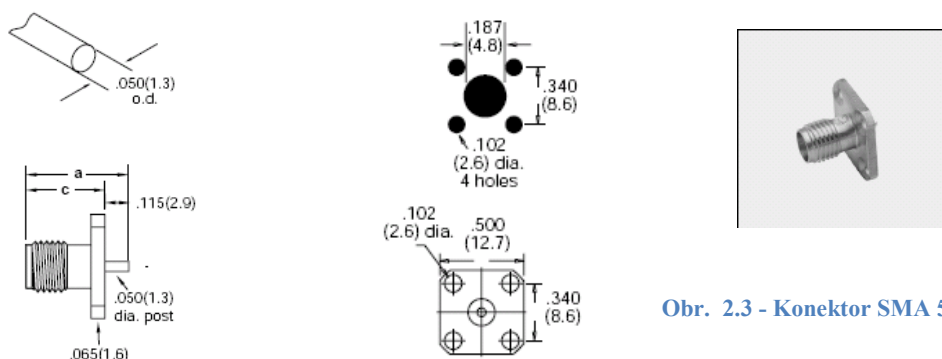
ϵ (mm)	d / \overline{AB}	f_1 , BW (MHz, %)	f_2 , BW (MHz, %)	f_2/f_1
0	1.0	1900, 1.8	2446, 2.4	1.287
8	1.0	1848, 1.8	2376, 2.4	1.286
12	0.94	1795, 1.8	2306, 2.3	1.285
14	0.87	1764, 1.7	2280, 2.2	1.292
16	0.59	1703, 1.5	2187, 2.0	1.284
18	0.20	1662, 1.4	2144, 1.8	1.290

Změnou rozměrů fličku naladíme první frekvenci a to při rozměrech $L = 39$ mm a $W = 28$ mm. Podle těchto rozměrů zvolíme velikost substrátu $L_s = 50$ mm a $W_s = 40$ mm. Poté vytvoříme křížovou štěrbinu $l = 10$ mm a tloušťka štěrbiny $m = 1$ mm a tím naladíme i druhou frekvenci.



Obr. 2.2 - Namodelovaná mikropásková anténa s křížovou štěrbinou v CST Studiu

K napájení antény použijeme koaxiální konektor SMA 500Ω , zásuvka, pájecí, standardní (obr. 2.3). Vnější vodič koaxiálního konektoru je připojen k zemní desce substrátu a středový koaxiální vodič je po průchodu substrátem připájený ke kovovému anténnímu prvku v takovém místě, v němž je dosaženo impedančního přizpůsobení. Tohoto je dosaženo ve vzdálenosti v ose x 5,5 mm a ose y 5,5 mm od středu mikropáskové antény, na obr. 2.1 označeno jako “feed”.



Obr. 2.3 - Konektor SMA 500Ω

2.3 Práce v CST Microwave Studiu

Prvním krokem je založení a vybrání správného druhu nového projektu. Pak se pustíme do samostatného návrhu antény v prostředí CST Microwave Studiu, přesněji v *Coupler* (*Planar*, *Microstrip*, *cpw*).

Pomocí záložek *Object Tools*, která obsahuje například *Create brick* nebo *Create cylinder*, vytvoříme mikropáskovou anténu s křížovou štěrbinou podle výpočtů v předchozí kapitole.

Je možné v tomto programu použít nástroj zrcadlení, nakreslit například polovinu nebo čtvrtinu antény pokud je souměrná a poté ji zrcadlit na celek. Tento nástroj jsem však nemohl využít z důvodu polohy napájení v jedné čtvrtině antény.

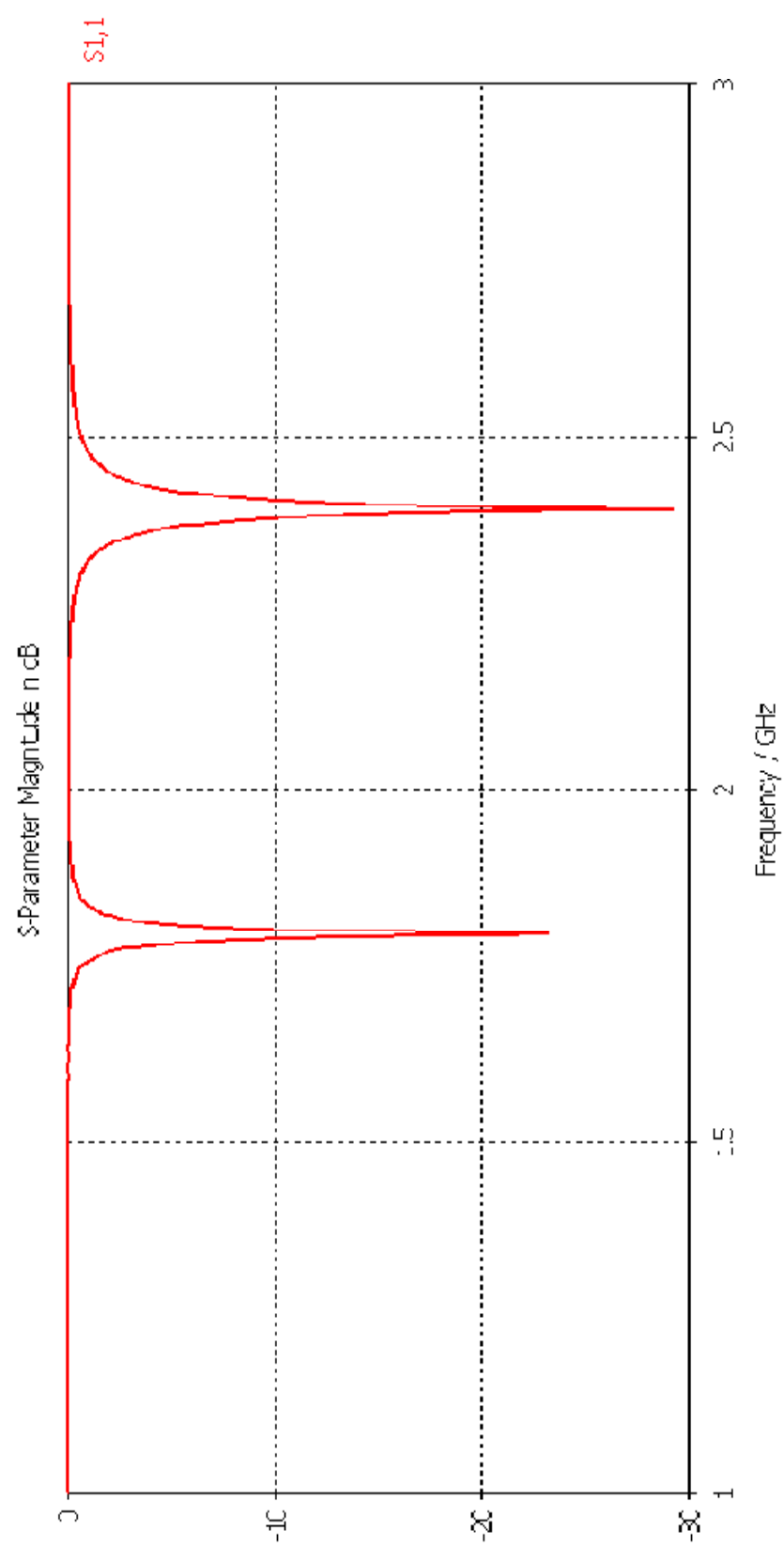
U takto vytvořené antény je potřeba umístit port, který slouží pro simulaci napájení. Vytvoříme jej nejprve položkou *Pick face (f)* a vybereme místo napájení. Poté zvolíme položku *Waveguide ports*, zvolíme totéž místo napájení a nastavíme parametry.

Nyní se dostáváme k samotnému nastavení simulace. Zvolíme položku *Specify boundary condition* a nastavíme potřebné parametry vyzařování. Dále položku *Transient solver* a nastavíme parametry simulace.

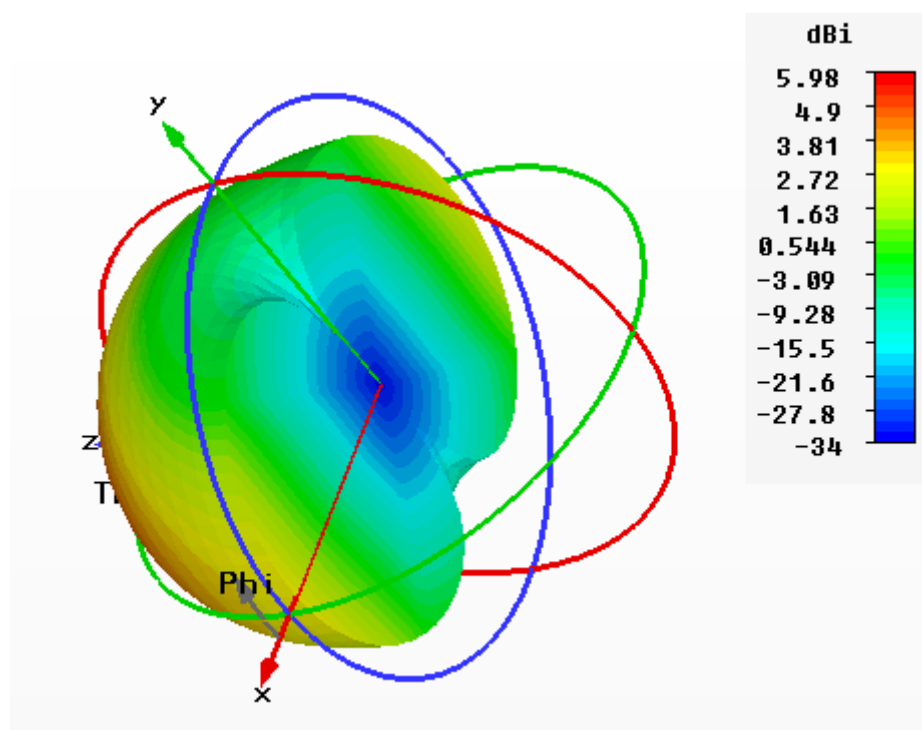
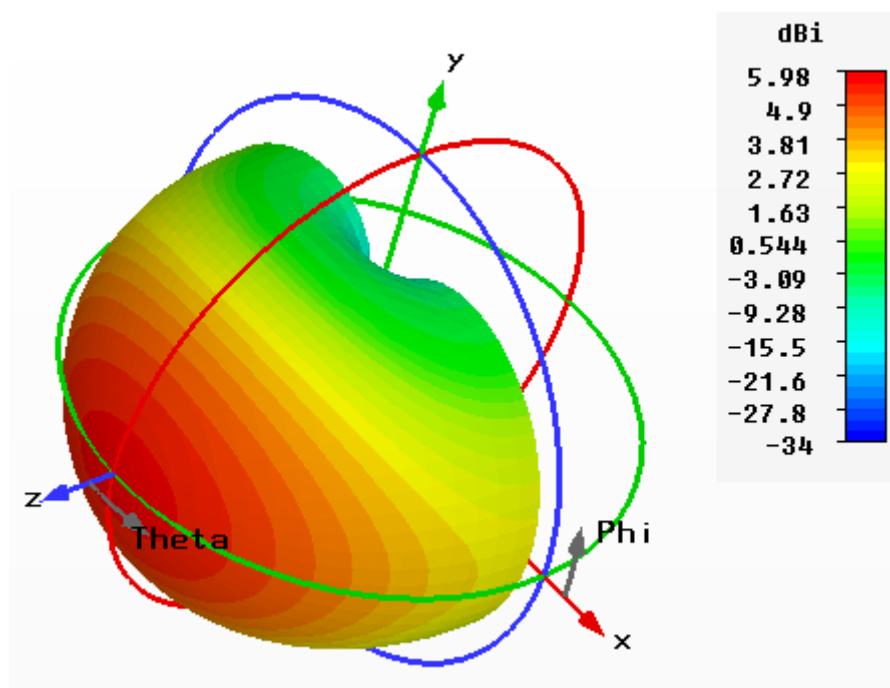
Potřebné výsledky simulace najdeme v liště vlevo v záložkách *ID Results*, *Farfields* a mnoha dalších mnoho dalších parametrů. Těmto výsledkům je věnována další kapitola.

2.4 Výsledky simulace v CST Microwave Studio

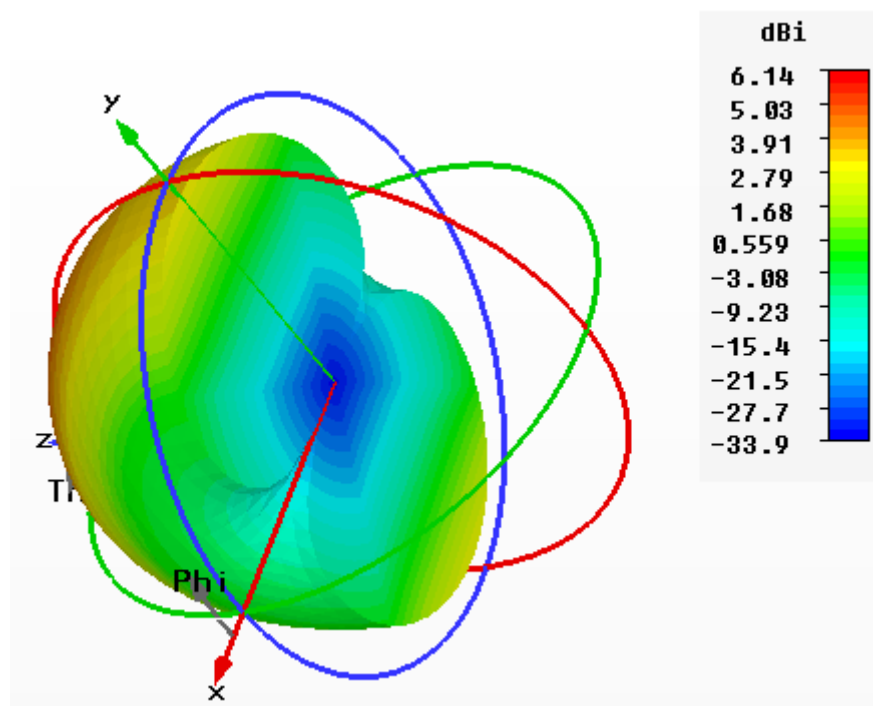
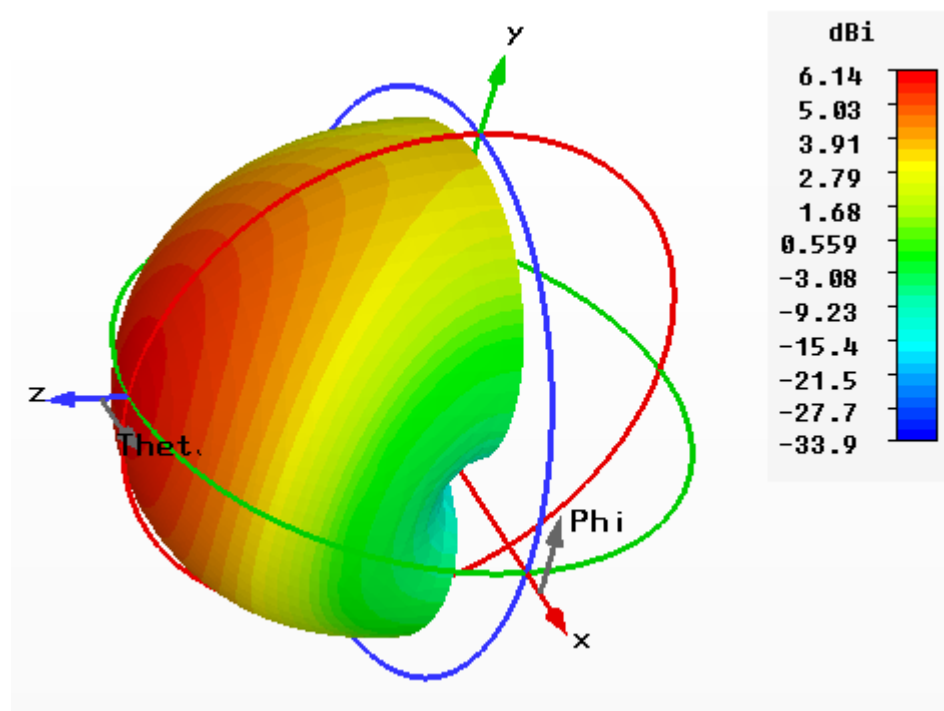
Nyní k samotným výsledkům simulací obdélníkové mikropáskové antény s křížovou štěrbinou a napájením koaxiálním kabelem. Namodelovaná anténa je zobrazena na obr. 3.2. Činitel odrazu ρ (parametr S_{11}) dosahuje hodnot 0,0692136 (-23,1962 dB) pro $f_1=1,796$ GHz a 0,03467 (-29,201 dB) pro $f_2=2,398$ GHz. Pokud z činitele odrazu vypočítáme podle vztahu (2) poměr stojatých vln $PSV(f_1)=1,149$ a $PSV(f_2)=1,072$, což značí dobré impedanční přizpůsobení.



Obr. 2.4 - Činitel odrazu (parametr s_{11})



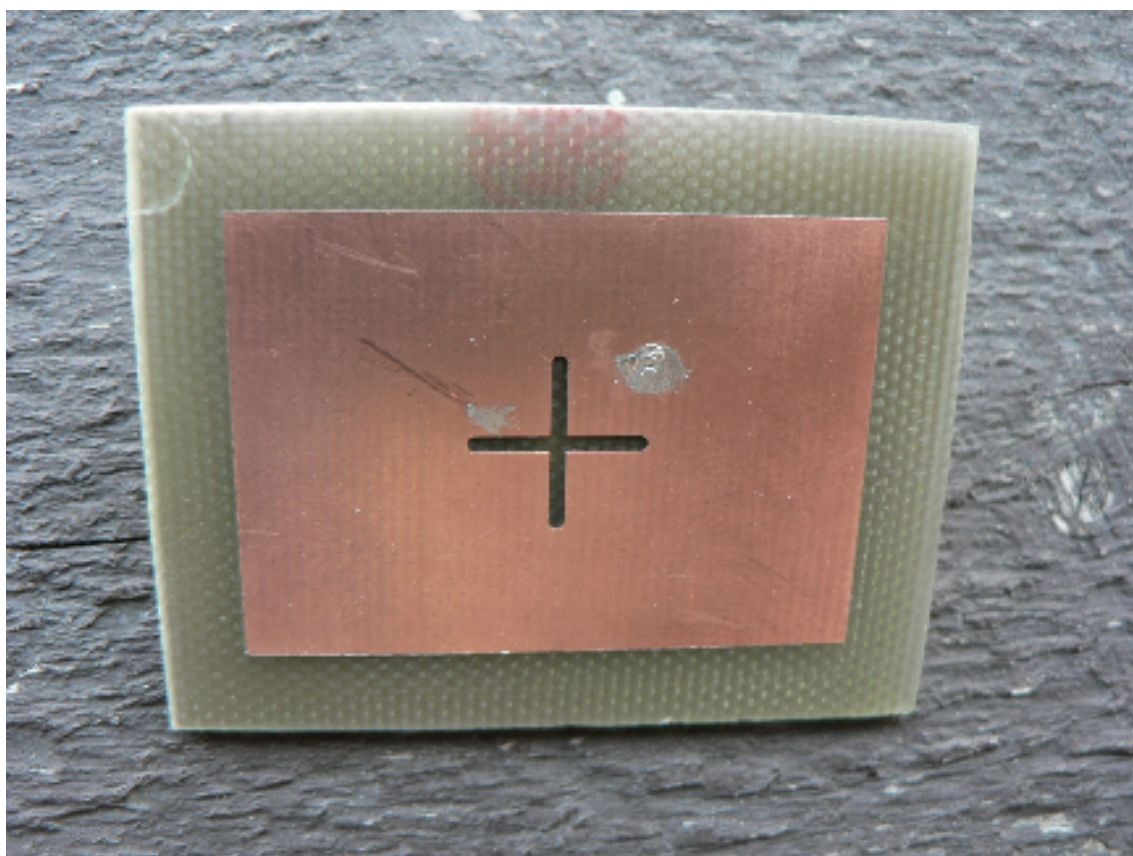
Obr. 2.5 - Vyzařovací charakteristiky na frekvenci 1,8 GHz



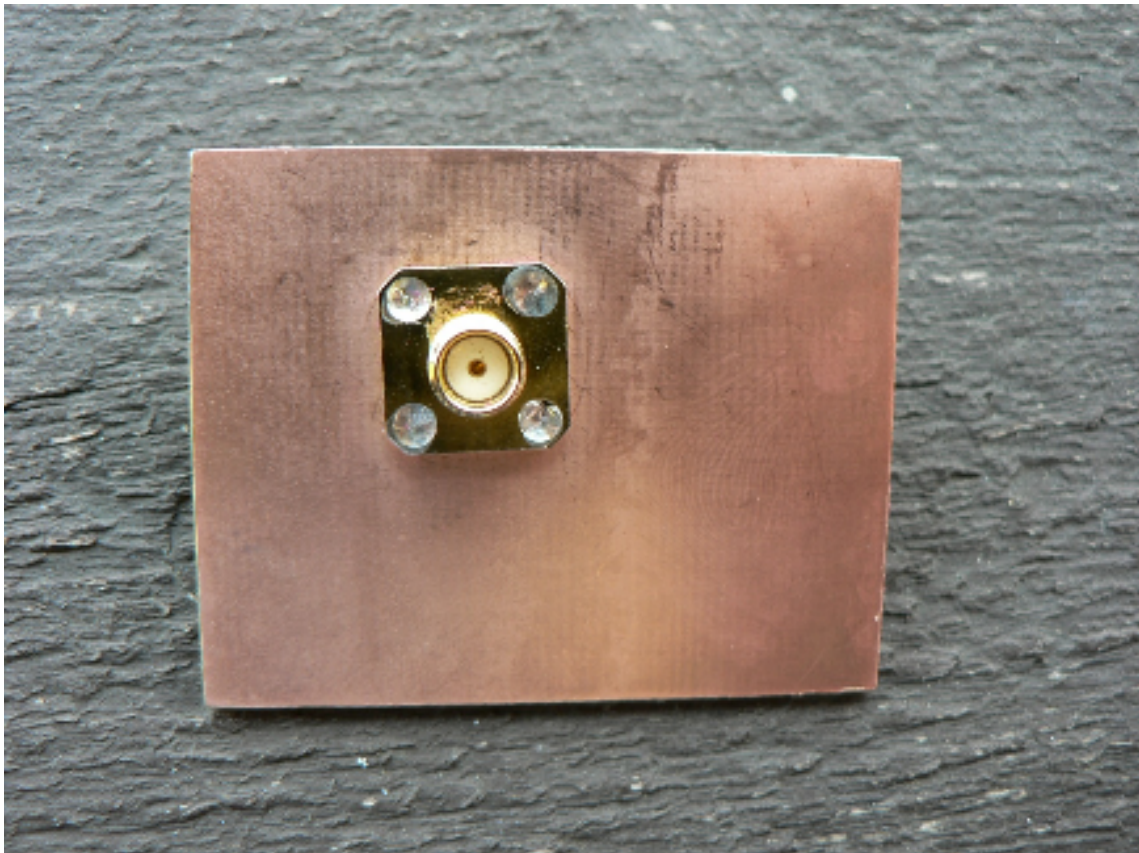
Obr. 2.6 - Vyzařovací charakteristiky na frekvenci 2,4 GHz

3 Výroba a měření

Pro výrobu mikropáskové antény s křížovou štěrbínou byla vybrána metoda frézování vodivého materiálu Cuprexitu, což je měď. Na obr. 3.1 a 3.2 je vyfocena vyrobená mikropásková anténa z čelního a zadního pohledu.

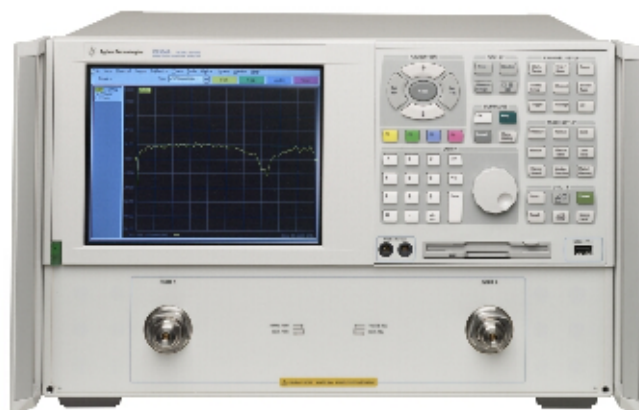


Obr. 3.1 – Mikropásková anténa s křížovou štěrbínou – čelní pohled

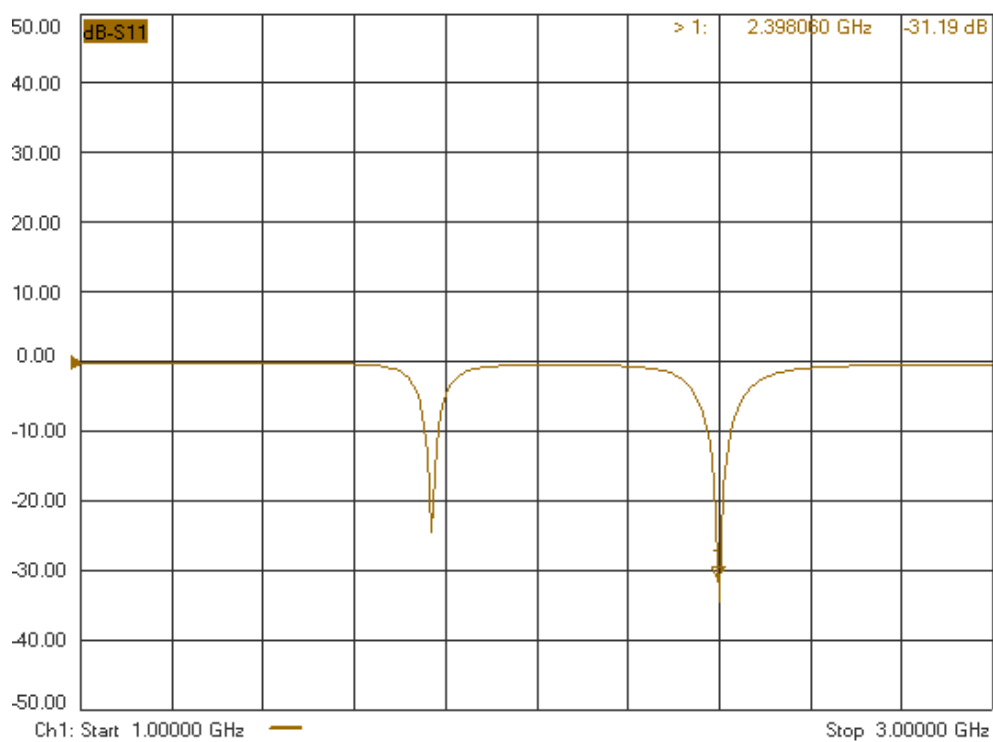


Obr. 3.2 - Mikropásková anténa s křížovou štěrbinou – zadní pohled

Měření byla provedena na vektorovém analyzátoru Agilent E8364B (obr. 3.3) v laboratoři č. 818 UREL, VUT v Brně. Vektorový analyzátor Agilent E8364B je určen pro měření s-parametrů v rozsahu frekvencí od 10 MHz do 50 GHz. Přístroj je přes síťové rozhraní připojen k PC a umožňuje snadný přenos naměřených dat pro další zpracování. Na obrázku 3.3 je naměřený průběh modulu činitele odrazu[5].



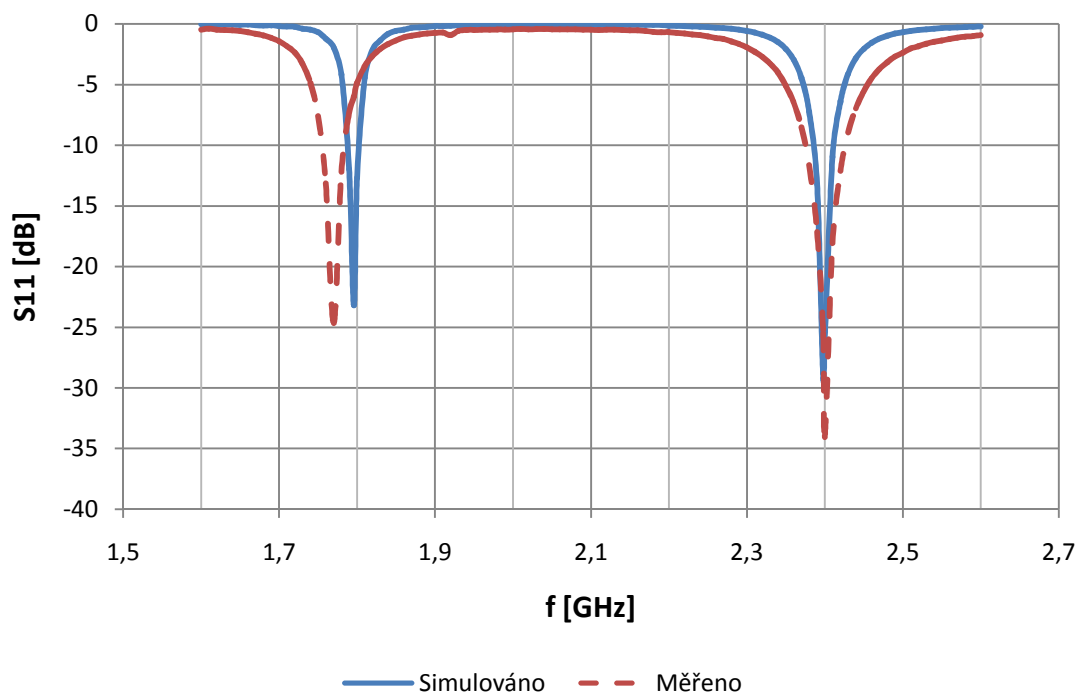
Obr. 3.3 - Vektorový analyzátor Agilent E8364B



Obr. 3.4 - Naměřený průběh modulu činitele odrazu

Činitel odrazu ρ (parametr S_{11}) dosahuje hodnot 0,05845 (-24,664 dB) pro $f_1=1,770$ GHz a 0,01982 (-34,059 dB) pro $f_2=2,4$ GHz. Pokud z činitele odrazu vypočítáme podle vztahu (2) poměr stojatých vln $PSV(f_1)=1,124$ a $PSV(f_2)=1,04$, což značí velmi dobré impedanční přizpůsobení.

Při srovnání parametru s_{11} při simulaci v CST Microwave Studiu a měření téhož parametru na vektorovém analyzátoru Agilent E8364B je patrné, že vyrobená anténa se liší od simulované frekvence 1,8 GHz o pouhých 30 MHz (1,77 GHz) a od frekvence 2,4 GHz se neliší vůbec, jak vidíme na obrázku 3.4. Výsledky měření této antény jsou v příloze č. 1.



Obr. 3.5 - Změřený a simulovaný průběh parametru S_{11} v decibelové míře

4 Závěr

Jedním z cílů práce bylo seznámit se s typy vícepásmových planárních antén. Byl uveden přehled běžně používaných konstrukcí takových antén v aplikacích pro bezdrátovou komunikaci. Hlavní náplní bakalářské práce bylo prostudování odborné literatury, návrh mikropáskové antény s křížovou šterbinou, její simulace, praktická realizace a měření parametrů. Pro návrh bylo využito komerčně dostupný simulační nástroj CST Microwave Studio 2006.

Změnou polohy napájení v ose x a y, rozměrů flíčku a rozměrů křížové šterbiny, byla anténa impedančně optimalizována. Z výsledků simulace je zřejmé, že namodelovaná anténa má dobré impedanční přizpůsobení.

Proto bylo přistoupeno k realizaci této antény. Anténa byla z důvodu prvotního měření vyrobena vyfrézováním flíčku a křížové šterbiny. Měřením bylo zjištěno, že anténa dosahuje velmi dobrých hodnot činitele odrazu (parametru s_{11}). Na frekvenci 1,8 GHz je modul činitele odrazu $\rho = -24,664$ dB a poměr stojatých vln $PSV = 1,124$. Na frekvenci 2,4 GHz je modul činitele odrazu $\rho = -34,059$ dB a poměr stojatých vln $PSV = 1,04$.

Výsledkem této práce je optimalizovaná mikropásková anténa s křížovou šterbinou, která dosahuje velmi dobrého impedančního přizpůsobení.

Vyrobená anténa se dá použít v kombinaci pásma GSM (na frekvenci 1,8 GHz) a WiFi (na frekvenci 2,4 GHz).

Literatura

- [1] BUREŠ, J. :*Slavní fyzici - životopisy*. 22.6.2009 dostupné na url: <http://www.converter.cz/fyzici>
- [2] PROCHÁZKA, M. *Antény - encyklopedická příručka*. 2.vydání, BEN Praha 2001.
- [3] GARG, R., BHARTIA, P., BAHL, I., ITTIPIBOON, A. *Microstrip antenna design handbook*. ARTECH HOUSE, INC., Boston, London 2001, ISBN 0-89006-513-6.
- [4] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z.: *Antény a šíření rádiových vln*. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2003.
- [5] JILKOVÁ, J. *Širokopásmové planární dipóly s koplanárním napájením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 69 s.
- [6] KIN-LU, W.: *Compact and Broadband Microstrip Antennas*. John Wiley & Sons, Inc., 2002
- [7] *CST Computer Simulation Technology AG*. 22.6.2009 dostupné na url: <http://www.cst.com>

Přílohy

Příloha 1 – výsledky měření

Agilent Technologies,

Date: Wednesday, July 01, 2009 13:32:22

Correction: S11(Full 2 Port SOLT,1,2)

S1P File: Measurement: S11:

# Hz	S dB	R 50
1000000000	-1.369062e-001	1.215242e+002
1010000000	-1.712222e-001	1.205582e+002
1020000000	-1.662920e-001	1.197937e+002
1030000000	-1.909753e-001	1.188697e+002
1040000000	-1.736038e-001	1.181187e+002
1050000000	-1.540376e-001	1.173672e+002
1060000000	-1.934197e-001	1.166032e+002
1070000000	-1.877419e-001	1.157669e+002
1080000000	-1.869528e-001	1.149619e+002
1090000000	-1.906198e-001	1.140298e+002
1100000000	-2.158507e-001	1.132521e+002
1110000000	-2.207915e-001	1.122945e+002
1120000000	-2.130511e-001	1.114536e+002
1130000000	-2.095338e-001	1.104007e+002
1140000000	-1.766165e-001	1.097101e+002
1150000000	-2.022159e-001	1.089222e+002
1160000000	-1.852399e-001	1.079847e+002
1170000000	-2.072003e-001	1.072224e+002
1180000000	-1.883178e-001	1.062709e+002
1190000000	-1.806399e-001	1.053950e+002
1200000000	-1.793758e-001	1.046002e+002
1210000000	-1.806573e-001	1.037082e+002
1220000000	-1.918907e-001	1.027632e+002
1230000000	-2.003601e-001	1.020917e+002
1240000000	-1.918420e-001	1.013083e+002
1250000000	-1.951582e-001	1.005883e+002
1260000000	-1.993653e-001	9.960928e+001
1270000000	-2.299862e-001	9.883450e+001
1280000000	-2.084339e-001	9.788713e+001
1290000000	-2.444553e-001	9.713681e+001
1300000000	-2.451505e-001	9.622569e+001
1310000000	-2.122194e-001	9.542691e+001
1320000000	-2.310348e-001	9.460061e+001
1330000000	-2.206818e-001	9.370016e+001
1340000000	-2.497390e-001	9.273469e+001

1350000000	-2.464168e-001	9.159735e+001
1360000000	-2.392260e-001	9.091640e+001
1370000000	-2.454268e-001	8.974377e+001
1380000000	-2.271111e-001	8.880324e+001
1390000000	-2.302937e-001	8.807800e+001
1400000000	-1.968640e-001	8.714009e+001
1410000000	-2.258958e-001	8.616798e+001
1420000000	-1.986802e-001	8.530850e+001
1430000000	-2.207395e-001	8.423564e+001
1440000000	-2.084277e-001	8.341666e+001
1450000000	-2.358200e-001	8.237932e+001
1460000000	-2.411358e-001	8.144234e+001
1470000000	-2.366256e-001	8.048933e+001
1480000000	-2.396284e-001	7.939729e+001
1490000000	-2.236513e-001	7.839957e+001
1500000000	-2.706547e-001	7.745518e+001
1510000000	-2.338816e-001	7.617139e+001
1520000000	-2.709749e-001	7.495725e+001
1530000000	-2.656094e-001	7.380840e+001
1540000000	-2.776568e-001	7.230275e+001
1550000000	-2.934421e-001	7.128609e+001
1560000000	-3.449057e-001	6.997598e+001
1570000000	-3.000879e-001	6.889727e+001
1580000000	-3.471576e-001	6.724124e+001
1590000000	-3.607624e-001	6.599049e+001
1600000000	-4.061642e-001	6.433723e+001
1610000000	-4.192755e-001	6.280794e+001
1620000000	-4.789972e-001	6.120007e+001
1630000000	-5.089516e-001	5.932784e+001
1640000000	-5.370817e-001	5.739531e+001
1650000000	-5.926431e-001	5.531135e+001
1660000000	-6.871727e-001	5.321492e+001
1670000000	-8.357394e-001	5.050097e+001
1680000000	-9.504216e-001	4.766633e+001
1690000000	-1.185225e+000	4.418544e+001
1700000000	-1.435811e+000	4.038481e+001
1710000000	-1.827322e+000	3.551743e+001
1720000000	-2.367045e+000	2.993414e+001
1730000000	-3.277523e+000	2.305857e+001
1740000000	-4.875198e+000	1.519414e+001
1750000000	-7.612151e+000	6.116405e+000
1760000000	-1.314452e+001	1.314394e-001
1770000000	-2.466429e+001	7.567995e+001
1780000000	-1.220932e+001	1.230566e+002
1790000000	-7.311823e+000	1.172234e+002
1800000000	-4.871172e+000	1.089038e+002

1810000000	-3.491810e+000	1.018216e+002
1820000000	-2.652726e+000	9.546344e+001
1830000000	-2.067182e+000	9.027313e+001
1840000000	-1.662938e+000	8.593847e+001
1850000000	-1.376121e+000	8.213582e+001
1860000000	-1.131555e+000	7.890320e+001
1870000000	-9.812810e-001	7.614952e+001
1880000000	-8.748807e-001	7.374402e+001
1890000000	-7.911599e-001	7.150336e+001
1900000000	-7.571545e-001	6.936443e+001
1910000000	-7.206593e-001	6.726105e+001
1920000000	-6.407622e-001	6.550536e+001
1930000000	-5.867060e-001	6.353024e+001
1940000000	-5.100901e-001	6.201041e+001
1950000000	-5.044477e-001	6.041779e+001
1960000000	-4.920473e-001	5.873253e+001
1970000000	-4.850005e-001	5.733687e+001
1980000000	-4.747753e-001	5.576192e+001
1990000000	-4.750670e-001	5.420653e+001
2000000000	-4.570169e-001	5.294876e+001
2010000000	-4.440907e-001	5.157587e+001
2020000000	-4.580469e-001	5.018312e+001
2030000000	-4.439129e-001	4.865548e+001
2040000000	-4.408964e-001	4.734701e+001
2050000000	-4.634633e-001	4.598574e+001
2060000000	-4.722415e-001	4.486243e+001
2070000000	-4.519562e-001	4.347817e+001
2080000000	-4.721493e-001	4.243312e+001
2090000000	-4.902509e-001	4.086189e+001
2100000000	-4.935636e-001	3.976777e+001
2110000000	-5.120377e-001	3.825895e+001
2120000000	-4.902185e-001	3.713397e+001
2130000000	-4.964585e-001	3.546693e+001
2140000000	-5.128177e-001	3.389935e+001
2150000000	-5.305799e-001	3.260355e+001
2160000000	-5.516808e-001	3.112782e+001
2170000000	-6.014637e-001	2.945569e+001
2180000000	-6.602431e-001	2.817403e+001
2190000000	-7.004998e-001	2.637508e+001
2200000000	-6.916215e-001	2.451416e+001
2210000000	-7.575991e-001	2.246908e+001
2220000000	-8.051135e-001	2.095092e+001
2230000000	-8.722323e-001	1.852917e+001
2240000000	-9.457337e-001	1.659168e+001
2250000000	-1.040947e+000	1.406120e+001
2260000000	-1.170223e+000	1.169633e+001

2270000000	-1.241407e+000	9.342430e+000
2280000000	-1.452347e+000	6.511619e+000
2290000000	-1.671106e+000	3.308681e+000
2300000000	-1.947230e+000	-1.874124e-001
2310000000	-2.298138e+000	-4.086599e+000
2320000000	-2.718136e+000	-8.160061e+000
2330000000	-3.280871e+000	-1.283237e+001
2340000000	-4.029703e+000	-1.792140e+001
2350000000	-5.100906e+000	-2.352599e+001
2360000000	-6.505068e+000	-2.941302e+001
2370000000	-8.538948e+000	-3.582951e+001
2380000000	-1.164671e+001	-4.267930e+001
2390000000	-1.716400e+001	-4.703939e+001
2400000000	-3.405935e+001	6.681041e+000
2410000000	-1.800882e+001	9.833846e+001
2420000000	-1.211693e+001	9.438908e+001
2430000000	-8.966190e+000	8.826750e+001
2440000000	-6.984025e+000	8.233955e+001
2450000000	-5.551277e+000	7.685127e+001
2460000000	-4.500775e+000	7.155629e+001
2470000000	-3.753532e+000	6.648122e+001
2480000000	-3.171257e+000	6.197586e+001
2490000000	-2.715021e+000	5.820179e+001
2500000000	-2.375437e+000	5.482748e+001
2510000000	-2.049007e+000	5.177007e+001
2520000000	-1.852121e+000	4.880570e+001
2530000000	-1.638818e+000	4.619161e+001
2540000000	-1.488293e+000	4.374950e+001
2550000000	-1.374985e+000	4.157384e+001
2560000000	-1.252476e+000	3.928841e+001
2570000000	-1.149711e+000	3.714954e+001
2580000000	-1.065723e+000	3.528929e+001
2590000000	-1.023990e+000	3.342676e+001
2600000000	-9.375384e-001	3.176238e+001
2610000000	-9.147846e-001	3.018254e+001
2620000000	-8.623310e-001	2.867385e+001
2630000000	-8.399554e-001	2.692825e+001
2640000000	-8.121948e-001	2.556119e+001
2650000000	-7.253284e-001	2.413614e+001
2660000000	-7.480674e-001	2.254304e+001
2670000000	-6.812944e-001	2.118587e+001
2680000000	-6.619793e-001	1.969599e+001
2690000000	-6.169663e-001	1.838659e+001
2700000000	-5.782651e-001	1.732038e+001
2710000000	-5.897321e-001	1.620483e+001
2720000000	-5.755653e-001	1.509914e+001

2730000000	-5.632351e-001	1.383584e+001
2740000000	-5.620653e-001	1.293834e+001
2750000000	-5.247898e-001	1.137293e+001
2760000000	-5.087136e-001	1.014431e+001
2770000000	-5.074909e-001	8.908949e+000
2780000000	-5.001480e-001	8.131305e+000
2790000000	-4.629231e-001	7.039733e+000
2800000000	-5.100881e-001	5.986539e+000
2810000000	-5.376204e-001	4.544067e+000
2820000000	-4.664249e-001	3.713829e+000
2830000000	-4.887930e-001	2.463456e+000
2840000000	-4.948744e-001	1.250033e+000
2850000000	-4.640735e-001	2.762801e-001
2860000000	-4.300377e-001	-1.215803e+000
2870000000	-4.703570e-001	-2.195411e+000
2880000000	-4.466406e-001	-3.400483e+000
2890000000	-4.542939e-001	-4.260067e+000
2900000000	-4.724568e-001	-5.418935e+000
2910000000	-4.368040e-001	-6.657244e+000
2920000000	-4.745517e-001	-7.692180e+000
2930000000	-4.719414e-001	-8.812091e+000
2940000000	-4.931540e-001	-1.018321e+001
2950000000	-5.187964e-001	-1.130581e+001
2960000000	-5.367512e-001	-1.253594e+001
2970000000	-4.986542e-001	-1.381341e+001
2980000000	-4.978971e-001	-1.496300e+001
2990000000	-5.677784e-001	-1.634484e+001
3000000000	-5.943573e-001	-1.766843e+001